

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
з виконання розрахунково-графічного завдання за темою
«РОЗРАХУНОК ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
ГАРМОНІЙНОГО СТРУМУ»

з дисциплін «Теоретичні основи електротехніки»,
«Теорія електричних та магнітних кіл»,
«Теорія електричних кіл»

для студентів спеціальностей
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»,
171 «Електроніка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 16.01.2019 р.

Харків
НТУ «ХП»
2019

Методичні вказівки з виконання розрахунково-графічного завдання по темі «РОЗРАХУНОК ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ГАРМОНІЙНОГО СТРУМУ» / уклад. М.М. Резинкіна, С.А. Литвиненко, А.В. Гетьман, О.Г. Кєссаєв, О.Є. Світлична, В.І. Ревуцький – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 44с.

Укладачі: М.М. Резинкіна, С.А. Литвиненко,
А.В. Гетьман, О.Г. Кєссаєв,
О.Є. Світлична, В.І. Ревуцький

Рецензент проф. Борисенко А.М.

Кафедра теоретичних основ електротехніки

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Сфера застосування	5
2. Ціль виконання	5
3. Порядок виконання	5
4. Вимоги до оформлення завдання	5
5. Загальні положення	7
6. Зміст завдання	17
7. Приклади розрахунків складного електричного кола гармонійного струму	18
8. Список джерел інформації	35
Додаток А. Варіанти завдання з розрахунку електричного кола гармонійного струму	36
Додаток Б. Приклад оформлення титульного аркуша	44

ВСТУП

Ці методичні вказівки містять загальні теоретичні положення з теми «Лінійні кола змінного струму», завдання для розрахунково-графічної роботи і приклади розрахунків кіл змінного струму.

Розрахунково-графічна робота присвячена темі «Лінійні електричні кола гармонійного струму» першого семестру навчання студентів по дисциплінах: «Теоретичні основи електротехніки», «Теорія електричних і магнітних кіл», «Теорія електричних кіл».

Знання та вміння з цієї теми мають визначальне значення для подальшого успішного вивчення студентами спеціальних дисциплін електротехнічного напрямку. На практиці значно поширений метод комплексних амплітуд, що використовує алгебру комплексних чисел і дозволяє застосовувати всі методи розрахунків кіл постійного струму до кіл змінного струму. Наведена методика побудови векторних діаграм є необхідною умовою засвоєння матеріалу теорії трифазних кіл. Всі ці методи застосовуються в різних спеціальних дисциплінах електротехнічного профілю.

У процесі виконання даного РГЗ студент може використовувати наведену наприкінці методичних вказівок літературу, в якій є додаткова інформація з теоретичних питань та приклади розв'язання подібних завдань.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 171 «Електроніка» денної і заочної форм навчання.

1. Сфера застосування

Дані методичні вказівки встановлюють вимоги до виконання розрахунково-графічного завдання «Розрахунок лінійних електричних кіл гармонійного струму» при вивченні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки», «Теорії електричних і магнітних кіл», «Теорія електричних кіл».

Зміст розрахунково-графічного завдання відповідає програмі підготовки фахівців електротехнічних спеціальностей.

2. Ціль виконання

У результаті виконання даного завдання студент повинен:

- 1) знати основні закони та методи розрахунків лінійних електричних кіл змінного струму;
- 2) уміти:
 - а) застосовувати закони та методи розрахунків електричних кіл для розв'язання конкретних завдань;
 - б) по результатам розрахунків побудувати векторну діаграму та часові графіки.

3. Порядок виконання

Розрахунково-графічне завдання виконується по мірі вивчення теоретичного матеріалу по даній темі.

4. Вимоги до оформлення завдання

4.1 При оформленні розрахунково-графічного завдання кожний розділ повинен містити:

- 1) завдання;

- 2) розрахункову частину;
- 3) графічну частину (векторну діаграму та часові графіки)
- 4) висновки (оцінку отриманих результатів).

4.2 Завдання виконують на аркушах паперу формату А4 (297х210)мм за ДСТ 9327. При необхідності допускається використання формату А3 (297х420)мм.

На аркушах повинні бути залишені поля: ліве, нижнє й верхнє – не менш 20 мм, праве – не менше 10 мм.

4.3 Сторінки роботи нумеруються арабськими цифрами у правому верхньому куті. Нумерація сторінок повинна бути наскрізною для всієї роботи. На титульному аркуші номер не ставиться, але його включають в загальну нумерацію сторінок. Форма титульного аркуша наведена в додатку Б.

4.4 Текст роботи виконується на одній стороні аркуша одним із способів:

а) рукописним – чітким, розбірливим почерком або креслярським шрифтом за ДСТ 2.304 з висотою букв і цифр не менш 2,5мм. Щільність запису повинна бути однаковою

б) друкованим – кегль 12 - 14 через півтора інтервалу.

4.5 Робота повинна бути зброшурована.

5. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

5.1 Гармонійні електричні величини

Електромагнітний процес в електричному колі називається періодичним, якщо значення струмів і напруг повторюються через рівні проміжки часу. Час, через який повторюються миттєві значення величин, називаються періодом T . $[T] = \text{с}$.

$$f(t \pm kT) = f(t). \quad (5.1)$$

Величина, зворотна періоду, називається частотою. $[f] = \text{с}^{-1} = \text{Гц}$.

$$f = \frac{1}{T}. \quad (5.2)$$

Найбільш поширеним і важливим видом періодичних струмів і напруг є синусоїдальні (гармонійні) струми і напруги.

Якщо прикладена до електричного кола напруга є синусоїдальною

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi_u), \quad (5.3)$$

то й струм у лінійному колі також буде синусоїдальним

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i), \quad (5.4)$$

де u, i – миттєві значення напруги та струму;

ω – кутова частота;

Ψ_u, Ψ_i – початкові фази напруги та струму;

U_m, I_m – амплітуди напруги та струму.

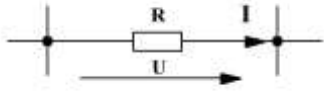
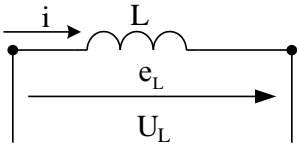
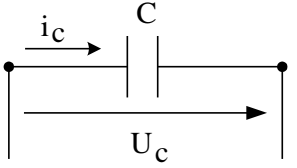
5.2 Параметри пасивних елементів кола

Пасивними елементами електричного кола змінного струму є:

- резистивний елемент з опором R , в якому електромагнітна енергія перетворюється на тепло,
- індуктивний елемент з індуктивністю L , який характеризує енергію магнітного поля $W_m = \frac{Li^2}{2}$ та явище самоіндукції $e_L = -L \frac{di}{dt}$,
- ємнісний елемент з ємністю C , який характеризує енергію електричного поля $W_e = \frac{Cu^2}{2}$.

В таблиці 5.1 наведені умовні позначення пасивних елементів на схемі та залежність напруги на елементах від параметрів елементів.

Таблиця 5.1

Елемент	Позначення на схемі	Зв'язок між струмом і напругою
R		$u_R = iR$
L		$u_L = L \frac{di}{dt}$
C		$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$

5.3 Комплексні зображення струмів та напруг

Усі основні закони та методи розрахунків електричних кіл постійного струму можна використовувати для розрахунків лінійних електричних кіл гармонійного струму. При цьому застосовують метод комплексних амплітуд (символічний метод). В ньому замість синусоїдальних струмів та напруг використовуються їх комплексні зображення (комплексні амплітуди або комплекси діючих значень). Це дозволяє замінити операції інтегрування та диференціювання (див. табл. 5.1) алгебраїчними операціями.

Комплексні амплітуди напруги і струму записують у такий спосіб:

$$\underline{U}_m = U_m e^{j\Psi_u}; \quad (5.5)$$

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\Psi_i}, \quad (5.6)$$

де U_m – амплітуда напруги;
 Ψ_u – початкова фаза напруги;
 I_m – амплітуда струму;
 Ψ_i – початкова фаза струму;
 $j = \sqrt{-1}$ – комплексна одиниця.

Від комплексної амплітуди можна перейти до комплексів діючого значення напруги і струму:

$$\underline{U} = \frac{\underline{U}_m}{\sqrt{2}} = U e^{j\Psi_u}; \quad (5.7)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\Psi_i}. \quad (5.8)$$

Для комплексних напруг та струмів виконуються закони Ома та Кірхгофа.

Таким чином, для розрахунків кіл гармонійного струму можна використовувати всі методи розрахунків електричних кіл, які використовуються для кіл постійного струму.

5.4 Закони Ома та Кірхгофа в комплексній формі

5.4.1 Закон Ома в комплексній формі

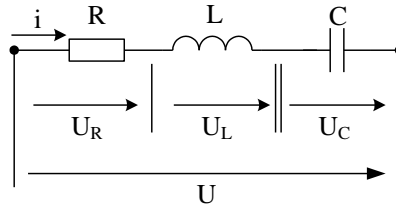


Рисунок 5.1 – Елементарна ділянка електричного кола змінного струму

Для пасивної ділянки електричного кола комплекс діючого значення струму дорівнює відношенню комплексу діючого значення напруги до комплексу повного опору ділянки:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad (5.9)$$

де \underline{Z} – комплекс повного опору ділянки.

Комплекс повного опору визначається формулою:

$$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi}, \quad (5.10)$$

де R – активний опір ділянки;

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \text{ – реактивний опір ділянки;}$$

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i \text{ – кут зсуву фаз між напругою та струмом.}$$

В таблиці 5.2 наведені комплексні опори пасивних елементів та залежність комплексів напруг на елементах від їх параметрів.

В таблиці 5.3 наведені комплексні опори послідовного з'єднаних елементів R і L та R і C .

Таблиця 5.2

Елемент	Комплексний опір елемента	Комплексна напруга на елементі
R	$\underline{Z} = R$	$\underline{U}_R = \underline{I}R$
L	$\underline{Z} = jX_L = j\omega L = \omega L e^{j90^\circ}$	$\underline{U}_L = \underline{I}j\omega L$
C	$\underline{Z} = jX_C = -j\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C} e^{-j90^\circ}$	$\underline{U}_C = \underline{I}\left(-j\frac{1}{\omega C}\right)$

Таблиця 5.3

Елементи ділянки	Комплексний опір ділянки
$R-L$	$\underline{Z} = R + jX_L = R + j\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{j\arctg\frac{X_L}{R}}$
$R-C$	$\underline{Z} = R + jX_C = R - j\frac{1}{\omega C} = \sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2} e^{\arctg\frac{X_C}{R}}$

5.4.2 Закони Кірхгофа в комплексній формі

Перший закон Кірхгофа в комплексній формі:

алгебраїчна сума комплексів діючих значень струмів, що сходяться у вузлі розгалуження електричному кола, дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0. \quad (5.11)$$

Другий закон Кірхгофа в комплексній формі:

алгебраїчна сума комплексів діючих значень падінь напруги в будь-якому замкненому контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі комплексів діючих значень ЕРС в цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^m \underline{Z}_k \underline{I}_k = \sum_{k=1}^l \underline{E}_k. \quad (5.12)$$

Примітка: у законах Ома та Кірхгофа можуть використовуватися також комплексні амплітуди $\underline{E}_m, \underline{U}_m, \underline{I}_m$.

Кількість незалежних рівнянь і правила знаків при записі рівнянь Кірхгофа визначаються так само як і для кіл постійного струму.

5.5 Визначення комплексної потужності, баланс потужностей кола, показання ватметра

Комплексна потужність визначається множенням комплексу напруги на сполучений комплекс струму:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U e^{j\Psi_u} \cdot I e^{-j\Psi_i} = S e^{j\varphi} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ \quad (5.13)$$

де \underline{I}^* – сполучений комплекс струму гілки;

P – активна потужність;

Q – реактивна потужність.

Два *сполучені комплексні числа* відрізняються тільки знаком перед уявною одиницею j ($\underline{I}_m = I_m e^{j\Psi_i}$; $\underline{I}_m^* = I_m e^{-j\Psi_i}$).

Баланс потужностей для кола гармонійного струму:

$$\sum \underline{S}_{\text{вир}} = \sum \underline{S}_{\text{спож}}, \quad (5.14)$$

де \underline{S} – комплекс повної потужності.

Вироблювана потужність дорівнює алгебраїчній сумі комплексів повних потужностей усіх джерел.

Комплексна потужність, вироблювана джерелом ЕРС:

$$\underline{S}_{\text{вир}} = \underline{E} \underline{I}^* = P_{\text{вир}} + jQ_{\text{вир}}, \quad (5.15)$$

де \underline{E} – комплекс ЕРС джерела;

$P_{\text{вир}}$ – вироблювана активна потужність;

$Q_{\text{вир}}$ – вироблювана реактивна потужність;

\underline{I}^* – сполучений комплекс струму тієї гілки, у яку включене джерело.

Споживану потужність визначають як суму комплексів повних потужностей окремих ділянок електричного кола. Комплекс повної потужності, споживаної гілками електричного кола, визначають по формулі:

$$\underline{S}_{\text{спож}} = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{Z} I^2 = RI^2 + jXI^2 = P_{\text{спож}} + jQ_{\text{спож}}, \quad (5.16)$$

де \underline{U} – комплекс напруги гілки;

\underline{I}^* – сполучений комплекс струму цієї гілки.

Вимірювання активної потужності виконується за допомогою ватметра. Ватметр має дві обмотки (рис. 5.2).

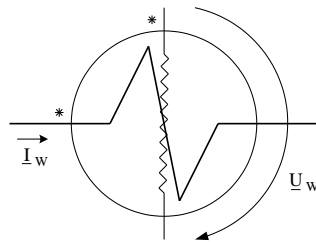


Рисунок 5.2

Обмотка, по якій протікає струм, має невелику кількість витків та великий поперечний переріз дроту з малим опором, вмикається послідовно в досліджуване коло (як амперметр). Струм повинен втікати в початок обмотки, що на схемі позначається зірочкою.

Обмотка напруги із великою кількістю витків з дроту з малим поперечним перерізом та великим опором, вмикається паралельно

досліджуваній ділянці кола (як вольтметр). Напруга ватметра вимірюється між контактом, позначеним зірочкою, та контактом без маркування.

Електрична схема включення ватметра для вимірювання активної потужності, яку споживає навантаження в колі змінного струму, показана на рис.5.3.

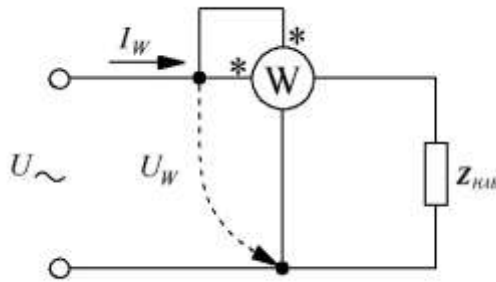


Рисунок 5.3

Ватметр вимірює активну потужність ділянки кола, до якої його приєднано. Активна потужність визначається, як дійсна частина повної потужності цієї ділянки, тобто визначається за формулою:

$$P_w = \operatorname{Re} \left[\underline{U}_w \underline{I}_w^* \right] = U_w I_w \cos \varphi, \quad (5.17)$$

де \underline{U}_w – напруга на затискачах обмотки вимірювання напруги ватметра,

\underline{I}_w^* – комплексно сполучений струм, що протікає по струмовій обмотці ватметра;

φ – кут зсуву фаз напруги та струму ватметра.

5.6 Використання комплексних чисел в розрахунках електричних кіл

При розрахунках кіл гармонійного струму необхідно вміти оперувати комплексними числами.

З курсу математики відомо, що комплексне число можна представити в алгебраїчній і показовій формах запису (табл. 5.4).

Перехід від показової форми запису до алгебраїчної виконують за допомогою формули Ейлера:

$$\underline{A} = Ae^{j\alpha} = A\cos\alpha + jA\sin\alpha = a + jb. \quad (5.18)$$

Перехід від алгебраїчної форми до показової:

$$\underline{A} = a + jb = \sqrt{a^2 + b^2} e^{j \arctg \frac{b}{a}} = Ae^{j\alpha}. \quad (5.19)$$

Слід пам'ятати, що якщо дійсна частина комплексного числа негативна, то в аргументі α необхідно врахувати кут $\pm\pi$ (це пов'язане з тим, що тангенс двох кутів, що відрізняються на $\pm\pi$, той самий).

Приклади:

$$1. \underline{A}_1 = -5 + j6 = \sqrt{5^2 + 6^2} e^{j \left(\arctg \frac{6}{-5} \pm 180 \right)} = 7,81 e^{-j230,2} = 7,81 e^{j129,8}$$

$$2. \underline{A}_2 = -4 - j3 = \sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \left(\arctg \frac{-3}{-4} \pm 180 \right)} = 5 e^{j216,9} = 5 e^{-j143,1}$$

Таблиця 5.4

Алгебраїчна форма	$\underline{A} = a + jb$	a – дійсна частина комплексного числа; b – уявна частина
Показова форма	$\underline{A} = Ae^{j\alpha}$	A – модуль (величина комплексного числа); α – аргумент

Дії з комплексними числами

1. *Додавання та віднімання* комплексних чисел виконують в алгебраїчній формі запису додаючи (віднімаючи) окремо дійсні та уявні частини:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \pm \underline{A}_2 = (a_1 + jb_1) \pm (a_2 + jb_2) = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2) = a + jb. \quad (5.20)$$

2. Множення (ділення) комплексних чисел зручно виконувати в показовій формі (але можна і в алгебраїчній формі) множенням (діленням) модулів та додаванням (відніманням) аргументів:

$$\underline{A} = A_1 e^{j\alpha_1} \cdot A_2 e^{j\alpha_2} = A_1 \cdot A_2 e^{j(\alpha_1 + \alpha_2)} = A e^{j\alpha}; \quad (5.21)$$

$$\underline{A} = \frac{A_1 e^{j\alpha_1}}{A_2 e^{j\alpha_2}} = \frac{A_1}{A_2} e^{j(\alpha_1 - \alpha_2)} = A e^{j\alpha}. \quad (5.22)$$

3. Зведення в ступінь виконують у такий спосіб:

$$\left(A e^{j\alpha} \right)^n = A^n e^{jn\alpha}. \quad (5.23)$$

6 ЗМІСТ ЗАВДАННЯ

Розрахунок розгалуженого електричного кола гармонійного струму

1) При відсутності магнітного зв'язку між котушками індуктивності:

- а) визначити струми і напруги в усіх гілках;
- б) скласти баланс активних і реактивних потужностей, перевірити його виконання і визначити показання ватметра;
- в) побудувати в масштабі векторну діаграму струмів і напруг;
- г) в одних координатних осях побудувати графіки миттєвих значень ЕРС $e(t)$ і струму в гілці джерела $i(t)$.

2) При наявності магнітного зв'язку між котушками індуктивності:

- а) скласти систему рівнянь за законами Кірхгофа в комплексній формі;
- б) методом магнітної розв'язки розрахувати струми і перевірити правильність розрахунків, підставивши величини знайдених струмів у систему рівнянь, складену за законами Кірхгофа;
- в) визначити напруги гілок;
- г) скласти баланс потужностей для двох гілок, що містять індуктивно зв'язані котушки.

Варіанти завдання наведені в додатку А.

7. ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ СКЛАДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

7.1 Розрахунок кола гармонійного струму при відсутності магнітного зв'язку між котушками

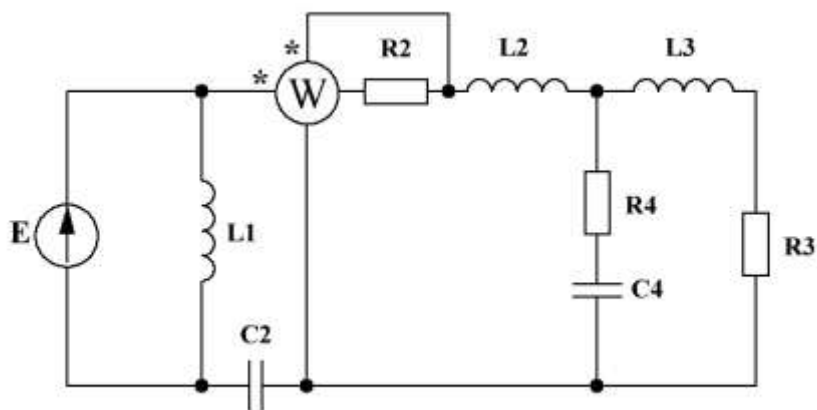


Рисунок 7.1

Параметри даного електричного кола (рис. 7.1) мають такі значення:

$E=120\text{ В}$	$L_1=8\text{ мГн}$	$C_2=66,5\text{ мкФ}$		$C_4=100\text{ мкФ}$
$\Psi_E=30^\circ$		$L_2=5.59\text{ мГн}$	$L_3=3,194\text{ мГн}$	
$f=200\text{ Гц}$		$R_2=1\text{ Ом}$	$R_3=3\text{ Ом}$	$R_4=6\text{ Ом}$

Важливо: для розрахунку електричного кола слід вилучити зі схеми вимірювальні прилади (в даному випадку – ватметр).

Для кола, показаного на рис. 7.2, визначити комплексним методом струми і напруги гілок, перевірити виконання балансу потужностей. Побудувати векторну діаграму й графіки миттєвих значень $e(t)$, $i(t)$.

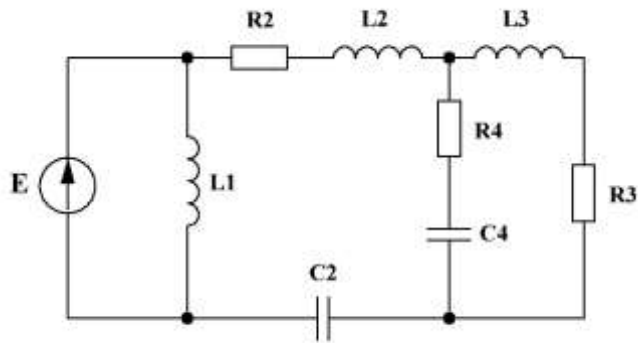


Рисунок 7.2

Розв'язання:

1) Визначення кутової частоти:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 200 = 1257 \text{ с}^{-1}.$$

2) Розрахунок реактивних опорів гілок (індуктивних і ємнісних опорів):

$$X_L = \omega L; \quad X_C = -\frac{1}{\omega C}$$

$$X_{L1} = \omega L_1 = 1257 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 10,06 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 1257 \cdot 5,59 \cdot 10^{-3} = 7,03 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = -\frac{1}{\omega C_2} = -\frac{1}{1257 \cdot 66,5 \times 10^{-6}} = -11,96 \text{ Ом};$$

$$X_{L3} = \omega L_3 = 1257 \cdot 3,194 = 4,01 \text{ Ом};$$

$$X_{C4} = -\frac{1}{\omega C_4} = -\frac{1}{1257 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = -7,96 \text{ Ом}.$$

3) Обчислення комплексних опорів гілок:

$$\underline{Z} = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} e^{j \arctg \frac{X}{R}} = Z e^{j\varphi}$$

Примітка: якщо гілка має лише реактивний опір X ($R=0$), то

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X}{0} = \arctg \pm \infty = \pm 90^\circ$$

$$\underline{Z}_1 = j\omega L_1 = j10,06 = 10,06 e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) = 1 + j(7,03 - 11,96) = 1 - j4,93 = 5,03 e^{-j78,5^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 = 3 + j4,01 = 5,01 e^{j53,2^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 - j\frac{1}{\omega C_4} = 6 - j7,96 = 9,97 e^{-j53^\circ} \text{ Ом}.$$

Як видно з рис. 7.3, це коло являє собою послідовно-паралельне з'єднання.

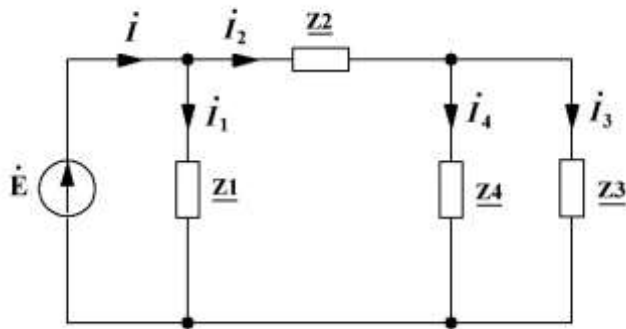


Рисунок 7.3

Гілки \underline{Z}_3 і \underline{Z}_4 з'єднані паралельно. Їхній еквівалентний опір визначається так:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{34} &= \frac{\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \frac{5,01 e^{j53,2^\circ} \cdot 9,97 e^{-j53^\circ}}{3 + j4,01 + 6 - j7,94} = \frac{43,95 e^{j0,2^\circ}}{9 - j3,95} = \frac{43,95 e^{j0,2^\circ}}{9,83 e^{-j23,7^\circ}} = 5,08 e^{j23,9^\circ} = \\ &= 4,64 + j2,06 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Опори \underline{Z}_2 і \underline{Z}_{34} з'єднані послідовно, що видно з рис. 7.4.

$$\underline{Z}_{234} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{34} = 1 - j4,93 + 4,64 + j2,06 = 5,64 - j2,87 = 6,33 e^{-j27} \text{ Ом.}$$

Опори \underline{Z}_1 і \underline{Z}_{234} з'єднані паралельно, але еквівалентний опір визначати немає необхідності, тому що напруга на цих опорах відома (дорівнює ЕРС джерела). Використовуючи закон Ома в комплексній формі можна розрахувати струми цих гілок.

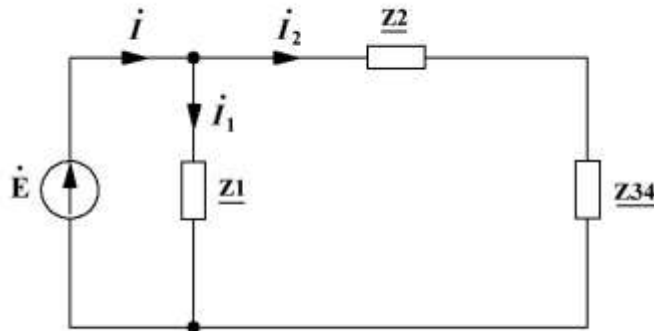


Рисунок 7.4

Комплексна форма ЕРС:

$$\underline{E} = E e^{j\psi_E} = 120 e^{j30^\circ} \text{ В.}$$

3) Визначення струмів гілок:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} = \frac{120 e^{j30^\circ}}{10,06 e^{j90^\circ}} = 11,93 e^{-j60^\circ} = 5,96 - j10,33 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{234}} = \frac{120 e^{j30^\circ}}{6,33 e^{-j27^\circ}} = 18,96 e^{j57^\circ} = 10,32 + j15,9 \text{ А.}$$

Струм \underline{I}_3 визначається по формулі розкиду:

$$\begin{aligned} \underline{I}_3 &= \underline{I}_2 \cdot \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \\ &= 18,96 e^{j57^\circ} \cdot \frac{9,97 e^{-j53^\circ}}{3 + j4,01 + 6 - j7,96} = 19,23 e^{j27,7^\circ} = 17,03 + j8,94 \text{ А.} \end{aligned}$$

Струми \underline{I}_4 та \underline{I} визначаються за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 10,32 + j15,9 - 17,03 - j8,94 = -6,71 + j6,96 = 9,67 e^{j134} \text{ А;}$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 5,96 - j10,33 + 10,32 + j15,9 = 16,28 + j5,57 = 17,21e^{j18,9} \text{ А.}$$

4) Визначення напруг гілок:

$$\underline{U}_1 = \underline{E} = 120e^{j30^\circ} = 103,92 + j60 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 = 5,03e^{-j78,5} \cdot 18,96e^{j57} = 95,37e^{-j21,5} = 88,73 - j34,95 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{34} = \underline{Z}_{34} \cdot \underline{I}_2 = 5,08e^{j23,9} \cdot 18,96e^{j57} = 96,32e^{j80,9} = 15,23 + j95,11 \text{ В.}$$

Правильність розрахунків перевіряється за допомогою другого закону Кірхгофа:

$$\underline{U}_2 + \underline{U}_{34} = \underline{E};$$

$$88,73 - j34,95 + 15,23 + j95,11 = 103,96 + j60,16;$$

$$103,96 + j60,16 \approx 103,92 + j60.$$

Другий закон Кірхгофа виконується, отже напруги гілок знайдені правильно.

5) Перевірка виконання балансу активних і реактивних потужностей.

Комплекс повної потужності, вироблюваної джерелом:

$$\underline{S}_{\text{вир}} = \underline{E} \cdot \underline{I}^* = P_{\text{вир}} + jQ_{\text{вир}} = 120e^{j30} \cdot 17,21e^{-j18,9} = 2065e^{j11,1} = 2026 + j398 \text{ ВА.}$$

Обчислення комплексів повних потужностей, споживаних гілками:

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}^* = 120e^{j30} \cdot 11,93e^{j60} = 1432e^{j90} = j1432 \text{ ВА;}$$

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* = 95,37e^{-j21,5} \cdot 18,96e^{-j57} = 1808e^{-j78,5} = 361 - j1772 \text{ ВА;}$$

$$\underline{S}_3 = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* = 96,32e^{j80,9} \cdot 19,23e^{-j27,7} = 1852e^{j53,2} = 1109 + j1483 \text{ ВА;}$$

$$\underline{S}_4 = \underline{U}_{34} \cdot \underline{I}_4^* = 96,32e^{j80,9} \cdot 9,67e^{-j134} = 931e^{-j53,1} = 559 - j745 \text{ ВА.}$$

Потужність, споживана всім колом:

$$\underline{S}_{\text{спож}} = P_{\text{спож}} + jQ_{\text{спож}} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 + \underline{S}_4 =$$

$$= j1432 + 361 - j1772 + 1109 + j1483 + 559 - j745 = 2029 + j398 \text{ ВА.}$$

Баланс активних потужностей:

$$P_{\text{вир}} = P_{\text{спож}} ; 2026 \text{ Вт} \approx 2029 \text{ Вт.}$$

Баланс реактивних потужностей:

$$Q_{\text{вир}} = Q_{\text{спож}} ; 398 \text{ ВАр} = 398 \text{ ВАр.}$$

Примітка: у рівняннях балансу активних і реактивних потужностей похибка не повинна перевищувати 5 %.

Таким чином, баланс активних і реактивних потужностей виконується, що підтверджує правильність розрахунків струмів і напруг електричного кола.

б) Визначення показань ватметра.

Активну потужність ділянки визначають за формулою (5.17):

$$P_w = \text{Re} \left[\underline{U}_w \underline{I}_w^* \right].$$

Напруга \underline{U}_w визначається за допомогою рівняння, складеного за другим законом Кірхгофа для контуру, що включає в себе цю напругу (рис. 7.5):

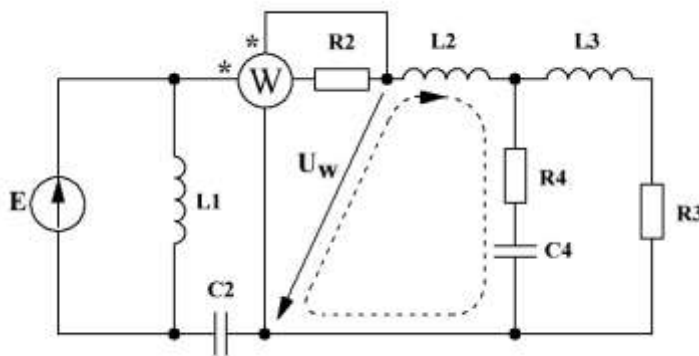


Рисунок 7.5

$$\underline{U}_{L2} + \underline{U}_{34} - \underline{U}_w = 0.$$

Звідси

$$\begin{aligned}\underline{U}_w &= \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{34} = \underline{I}_2 \cdot j\omega L + \underline{U}_{34} = (10,32 + j15,9) \cdot j7,03 + 15,23 + j95,11 = \\ &= j72,55 - 111,78 + 15,23 + j95,11 = -96,55 + j167,66 = \\ &= 193,36e^{j119,9^\circ} \text{ В.}\end{aligned}$$

Струм \underline{I}_w^* відповідає струму, що протікає в другій гілці:

$$\underline{I}_w^* = \underline{I}_2^* = 18,96e^{-j57^\circ} \text{ А.}$$

Показання ватметра:

$$\begin{aligned}P_w &= \operatorname{Re} \left[193,36e^{j119,9^\circ} \cdot 18,96e^{-j57^\circ} \right] = \operatorname{Re} \left[3666,1e^{j62,9^\circ} \right] = 3666,1 \cdot \cos 62,9^\circ = \\ &= 1670 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

б) Побудова векторної діаграми.

Векторну діаграму для розгалуженого кола будують згідно з рівняннями, складеними за законами Кірхгофа:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \quad (7.1)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_3 + \underline{I}_4; \quad (7.2)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{34} + \underline{U}_2. \quad (7.3)$$

Для побудови векторної діаграми використовують діючі значення струмів і напруг на ділянках кола, а також кути зсуву фаз між ними. Діючі значення напруг, струмів і кути зсуву фаз:

$U_1 = E = 120 \text{ В}$	$I_1 = 11,93 \text{ А};$	$\varphi_1 = 90^\circ$
$U_2 = 95,37 \text{ В}$	$I_2 = 18,96 \text{ А}$	$\varphi_2 = -78,5^\circ$
$U_{34} = 96,32 \text{ В}$	$I_3 = 19,23 \text{ А}$	$\varphi_3 = 53,2^\circ$
	$I_4 = 9,67 \text{ А}$	$\varphi_4 = -53^\circ$
	$I = 17,21 \text{ А}$	

Важливо:

- на векторній діаграмі зсув фаз відкладають від вектору струму до вектору напруги.

При цьому, якщо кут $\varphi > 0$ (індуктивний характер ділянки), його відкладають *проти годинникової стрілки*, а якщо $\varphi < 0$ (ємнісний характер) – *за годинниковою стрілкою*.

- Векторна сума двох векторів виконується за *правилом паралелограма*. Якщо необхідно побудувати вектор суми більшої кількості векторів, кожен наступний вектор будують від кінця попереднього. Вектор суми з'єднує початок першого вектору з кінцем останнього.

- Слід обрати масштаби напруги m_U і струму m_I .

Векторну діаграму для розгалуженого кола починають будувати з розгалуженої ділянки. Оскільки третя і четверта гілки з'єднані паралельно, то першим відкладають вектор напруги U_{34} і будують від нього струми I_4 та I_3 під кутами зсуву фаз $-\varphi_4$ і $-\varphi_3$, як показано на рис. 7.6.

Побудовані вектори струмів I_4 та I_3 геометрично додають, їх сума дорівнює струму I_2 , згідно з рівнянням (7.2). Далі, згідно з рівнянням (7.3), до вектору U_{34} додають вектор напруги другої гілки U_2 , повернувши його на кут φ_2 відносно струму I_2 . Додавши геометрично U_{34} та U_2 , одержують напругу U_1 , що дорівнює ЕРС E .

І, на закінчення, до вектору I_2 , згідно з рівнянням (7.1), додають вектор струму I_1 , побудований під кутом $-\varphi_1$ відносно напруги U_1 . Геометрична сума векторів струмів I_1 і I_2 дорівнює струму джерела I .

Отже, діаграма побудована в такій послідовності:

$$\begin{aligned} \overline{U}_{34} &\xrightarrow{-\varphi_4} \overline{I}_4 \xrightarrow{+} \overline{I}_2 \xrightarrow{\varphi_2} \overline{U}_{34} \xrightarrow{+} \overline{U}_2 = \overline{U}_1 \xrightarrow{-\varphi_1} \\ &\xrightarrow{-\varphi_3} \overline{I}_3 \end{aligned}$$
$$\rightarrow \overline{I}_1 \rightarrow \overline{I}_1 + \overline{I}_2 = \overline{I}$$

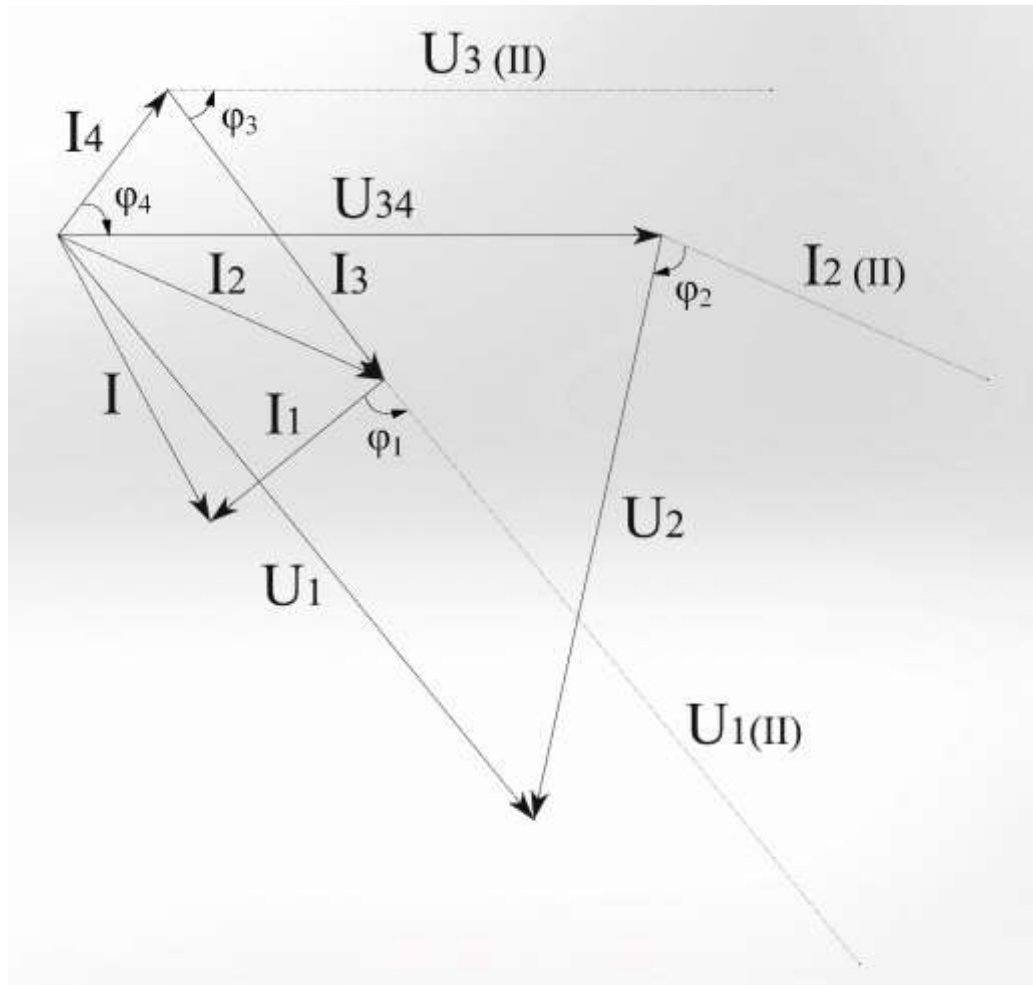


Рисунок 7.6

7) Побудова часових графіків

Миттєві значення ЕРС $e(t)$ і струму в гілці джерела $i(t)$ можна записати, використовуючи комплекси діючих значень ЕРС $\underline{E} = 120e^{j30^\circ}$ та обчисленого струму $\underline{I} = 17,21e^{j18,9^\circ}$:

$$e(t) = 120\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) = 170 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ В};$$

$$i(t) = 17,21\sqrt{2} \sin(\omega t + 18,9^\circ) = 24 \sin(\omega t + 18,9^\circ) \text{ А}.$$

Їхні графіки показані на рис. 7.7.

Вісь ωt може бути розмічена в радіанах або градусах (наприклад, 30° відповідає $\frac{\pi}{6}$ радіан, а $18,9^\circ$ відповідає $0,11\pi$ радіан). Позитивна початкова фаза відкладається на горизонтальній осі ліворуч від початку координат, негативна – праворуч. Правіше цієї відмітки починається позитивна півхвиля синусоїди.

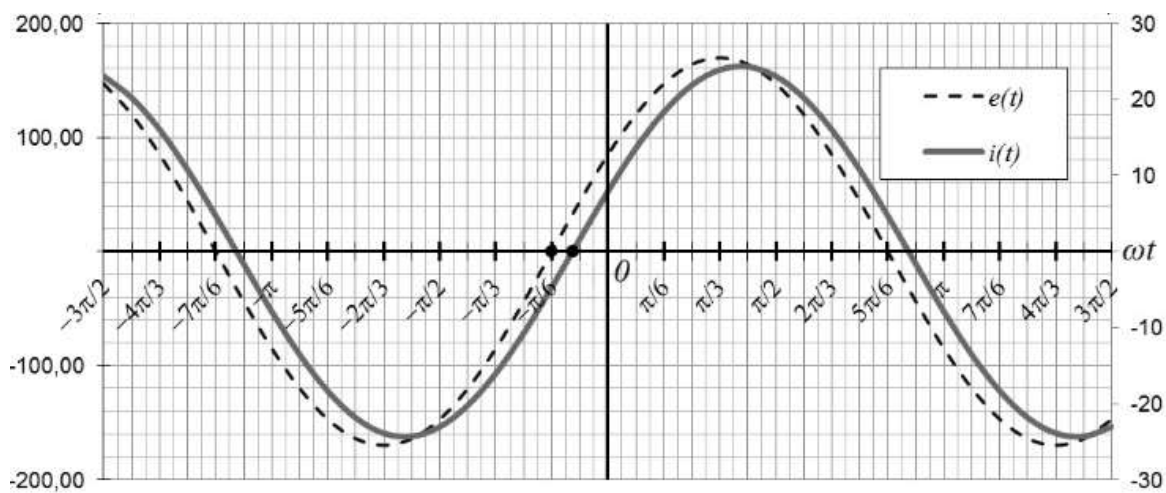


Рисунок 7.7

7.2 Розрахунок електричного кола гармонійного струму при наявності індуктивного зв'язку між котушками

Якщо змінний струм в одній з котушок індуктивності приводить до появи ЕРС в іншій, то ці дві котушки мають магнітний зв'язок (вони є індуктивно зв'язаними), а виникаючу ЕРС називають ЕРС взаємної індукції. ЕРС взаємної індукції повинна бути врахована при розрахунках електричного кола.

Напруга в такій котушці L_k залежить від власного струму i_k , що створює ЕРС самоіндукції $e_c = -L_k \frac{di_k}{dt}$, та від струму i_m магнітно зв'язаної котушки L_m , що створює в котушці L_k ЕРС взаємоіндукції $e_b = \mp M \frac{di_m}{dt}$:

$$u_k = L_k \frac{di_k}{dt} \pm M \frac{di_m}{dt}. \quad (7.4)$$

де M – взаємна індуктивність котушок k та m .

Якщо струми котушок спрямовані однаково відносно однойменних затискачів котушок, то котушки з'єднані *згідно*. В такому випадку власний та взаємний магнітні потоки в кожній з них збігаються за напрямом, підсилюючи результуючі потік та напругу, тож у виразі для напруги (7.4) другий доданок має позитивний знак.

Якщо струми котушок спрямовані протилежно – котушки з'єднані *зустрічно*. В такому випадку власний та взаємний магнітні потоки в кожній з них мають протилежні напрями, послаблюючи результуючі потік та напругу, тож у виразі для напруги (7.4) другий доданок має негативний знак.

В комплексній формі вираз для цієї напруги має вигляд:

$$\underline{U}_k = j\omega L_k \underline{I}_k \pm j\omega M \underline{I}_m. \quad (7.5)$$

Для розрахунків розгалуженого кола застосовують закони Кірхгофа, метод контурних струмів або спеціальний прийом, що називається «розв'язкою» індуктивного зв'язку.

Для прикладу використана схема попереднього завдання (див. рис. 7.1). В ній введений індуктивний зв'язок між котушками другої і третьої гілок, як показано на рис. 7.6.

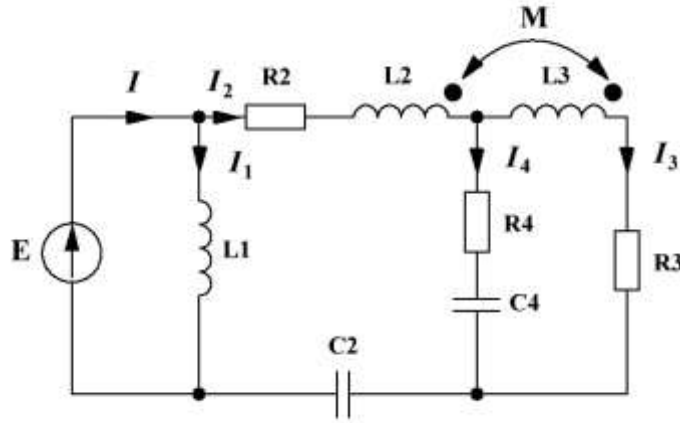


Рисунок 7.6

Значення параметрів джерела і опори елементів кола задані:

$$E = 120 \text{ В}; \quad \Psi_E = 30^\circ; \quad \omega L_1 = 10,05 \text{ Ом}; \quad R_2 = 1 \text{ Ом}; \quad \omega L_2 = 7,02 \text{ Ом};$$

$$\frac{1}{\omega C_2} = 11,97 \text{ Ом}; \quad \omega L_3 = 4,01 \text{ Ом}; \quad R_3 = 3 \text{ Ом}; \quad R_4 = 6 \text{ Ом};$$

$$\frac{1}{\omega C_4} = 7,96 \text{ Ом}; \quad \omega M = 2 \text{ Ом}.$$

1) Система рівнянь у комплексній формі за законами Кірхгофа.

Слід задати напрямки струмів у гілках. Напрямок обходу контурів обрано за годинниковою стрілкою.

$$\begin{cases} \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{I}_2 = \underline{I}_3 + \underline{I}_4; \\ j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1 = \underline{E}; \\ (R_2 + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2})\underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_3 + (R_4 - j\frac{1}{\omega C_2})\underline{I}_4 = \underline{E}; \\ (R_3 + j\omega L_3)\underline{I}_3 + j\omega M \underline{I}_2 - (R_4 - j\frac{1}{\omega C_4})\underline{I}_4 = 0. \end{cases} \quad (7.6)$$

Струми I_2 і I_3 спрямовані однаково щодо однойменних затискачів котушок L_2 і L_3 , тобто має місце згідне включення. (У випадки різного напрямку струмів I_2 і I_3 щодо однойменних затискачів буде мати місце зустрічне включення). Тому перед доданками $j\omega M \underline{I}_2$ та $j\omega M \underline{I}_3$ у рівняннях (7.6) поставлений знак «плюс», бо напрямки струмів I_2 і I_3 збігаються з напрямком обходу контурів і має місце згідне включення.

2) «Розв'язка» індуктивного зв'язку.

Суть прийому полягає в тому, що схему, яка містить індуктивні зв'язки, заміняють еквівалентною схемою без індуктивних зв'язків.

Загальне правило розв'язки індуктивного зв'язку:

якщо дві індуктивне зв'язані гілки підключені до вузла розгалуження електричного кола своїми *однойменними* затискачами, то при «розв'язанні» індуктивного зв'язку в ці гілки додатково вводиться індуктивність « $-M$ », а у третю, вільну від магнітного зв'язку гілку (також підключену до цього вузла), уводиться індуктивність « $+M$ ». Якщо індуктивне зв'язані гілки підключені до вузла своїми *різнойменними* затискачами, то при «розв'язанні» у ці гілки вводиться індуктивність « $+M$ », а у вільну від зв'язку гілку – індуктивність « $-M$ ».

Примітка: з використанням методу «розв'язки» можна розраховувати *лише струми*. Напруги розраховують за допомогою II закону Кірхгофа по початковій схемі (рис. 7.6).

На рис. 7.7 наведені приклади кількох різних схем із двома індуктивне зв'язаними котушками та відповідні їм «розв'язки».

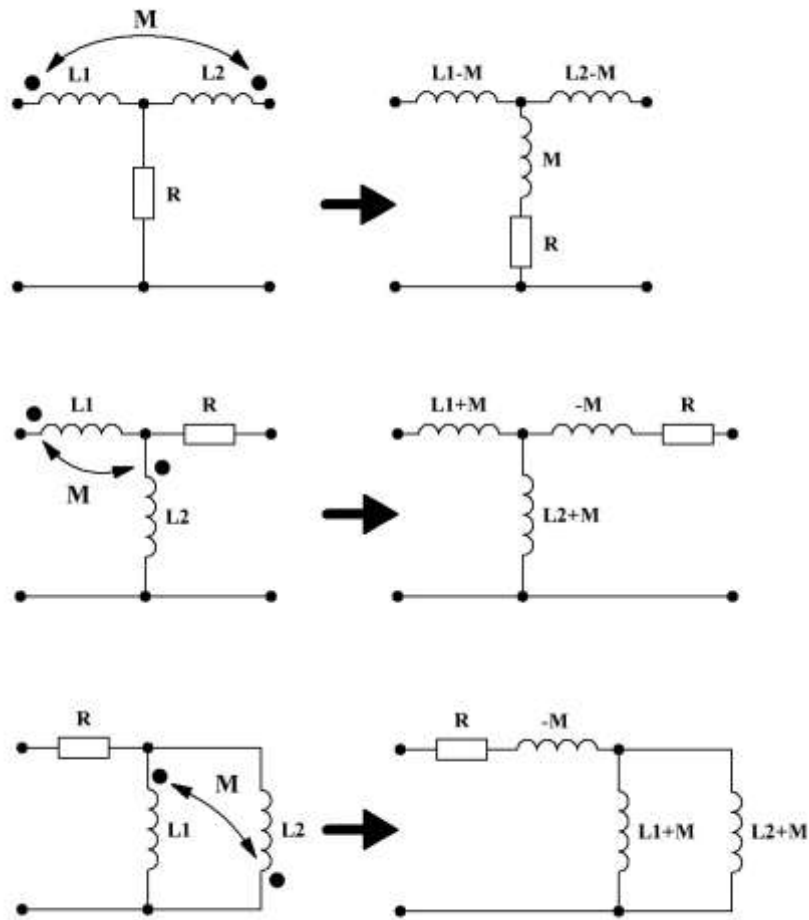


Рисунок 7.7

3) Для розрахунків струмів схеми (див. рис. 7.6) застосовано метод індуктивної розв'язки. Зробивши «розв'язку» індуктивного зв'язку, одержують схему, показану на рис. 7.8.

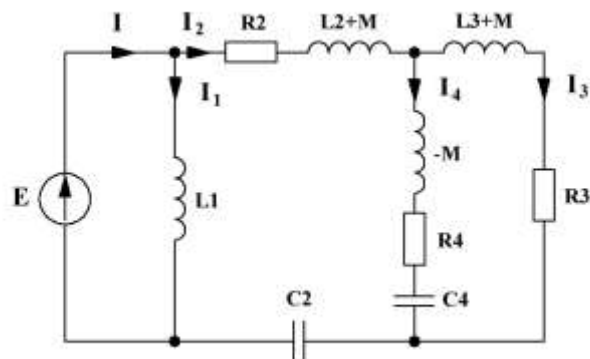


Рисунок 7.8

Отримана схема являє собою послідовно-паралельне з'єднання. У цій схемі струми гілок будуть такими ж, як і у вихідній схемі (див. рис. 7.6), а напруги будуть іншими.

4) Розрахунок комплексних опорів гілок:

$$\underline{Z}_1 = j\omega L_1 = j10,06 = 10,06e^{j90} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j(\omega L_2 + \omega M - \frac{1}{\omega C_2}) = 1 + j(7,02 + 2 - 11,97) = 1 - j2,95 = 3,11e^{-j71,5} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j(\omega L_3 + \omega M) = 3 + j(4,01 + 2) = 3 + j6,01 = 6,72e^{j63,5} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + j(-\omega M - \frac{1}{\omega C_4}) = 6 + j(-2 - 7,96) = 6 - j9,96 = 11,63e^{-j58,9} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{34} = \frac{\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \frac{6,72e^{j63,5} \cdot 11,63e^{-j58,9}}{3 + j6,01 + 6 - j9,96} = 7,95e^{j28,3} = 7 + j3,77 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{234} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{34} = 1 - j2,95 + 7 + j3,77 = 8 + j0,82 = 8,04e^{j5,9} \text{ Ом}.$$

5) Розрахунок струмів:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} = 11,94e^{-j60} = 5,97 - j10,34 \text{ А};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{234}} = \frac{120e^{j30}}{8,04e^{j5,9}} = 14,93e^{j24,1} = 13,63 + j6,1 \text{ А};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_2 \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = 14,93e^{j24,1} \frac{11,63e^{-j58,9}}{3 + j6,01 + 6 - j9,96} = 17,66e^{-j11,1} = 17,33 - j3,4 \text{ А};$$

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 13,63 + j6,1 - 17,33 + j3,4 = -3,7 + j9,5 = 10,2e^{j114,3} \text{ А};$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 5,97 - j10,34 + 13,63 + j6,1 = 19,6 - j4,24 = 20,05e^{-j12,2} \text{ А}.$$

Правильність розрахунків струмів перевіряють занесенням знайдених струмів в систему рівнянь, складену за законами Кірхгофа (7.4).

б) Розрахунок напруг окремих ділянок

Схема магнітної розв'язки (див. рис. 7.8) використовується тільки для розрахунку струмів. Для визначення напруг гілок використовують початкову схему (див. рис. 7.6).

$$\underline{U}_1 = \underline{E} = 120e^{j30} = 103,92 + j60 \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= (R_2 + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2})\underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_3 = (1 + j7,02 - j11,97)(13,63 + j6,1) + \\ &+ j2(17,33 - j3,4) = 50,63 - j26,71 = 57,24e^{-j27,8} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_3 &= (R_3 + j\omega L_3)\underline{I}_3 + j\omega M \underline{I}_2 = (3 + j4,01)(17,33 - j3,4) + j2(13,63 + j6,1) = \\ &= 53,42 + j86,55 = 101,71e^{58,3} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\underline{U}_4 = (R_4 - j\frac{1}{\omega C_4})\underline{I}_4 = \underline{U}_3.$$

7) Баланс потужностей для другої і третьої гілок.

Обчислення потужностей, що надходять у другу й третю гілки від джерела:

$$\underline{S}_{2\text{ном}} = \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = 57,24e^{-j27,8} \cdot 14,93e^{-j24,1} = 854,6e^{-j51,9} = 527 - j672 \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_{3\text{ном}} = \underline{U}_2 \underline{I}_3^* = 101,71e^{j58,3} \cdot 17,66e^{j11,1} = 1796,2e^{j69,4} = 632 + j1681 \text{ ВА}.$$

Визначення потужностей, споживаних елементами гілок:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{2\text{спо}} &= R_2 I_2^2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) I_2^2 = 1 \cdot 14,93^2 + j(7,02 - 11,97)14,93^2 = \\ &= 223 - j1103 \text{ ВА}; \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{3\text{спож}} = R_3 I_3^2 + j\omega L_3 I_3^2 = 3 \cdot 17,66^2 + j4,01 \cdot 17,66^2 = 936 + j1251 \text{ ВА}.$$

Визначення потужностей, перенесених магнітними потоками внаслідок явища взаємоіндукції:

$$\underline{S}_{2M} = j\omega M \underline{I}_3 \underline{I}_2^* = 2e^{j90} \cdot 17,66e^{-j11.1} \cdot 14,93e^{-j24.1} = 527,3e^{j54.8} =$$

$$= 304 + j431 \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_{3M} = j\omega M \underline{I}_2 \underline{I}_3^* = 2e^{j90} \cdot 14,93e^{j24.1} \cdot 17,66e^{j11.1} = 527,3e^{j125.2} =$$

$$= -304 + j431 \text{ ВА}.$$

Потужність, що надходить у гілки від джерела, дорівнює сумі потужності, споживаної елементами цієї гілки, і потужності, перенесеної магнітним полем:

$$\underline{S}_{2\text{спож}} + \underline{S}_{2M} = 223 - j1103 + 304 + j431 = 527 - j672 = \underline{S}_{2\text{пост}};$$

$$\underline{S}_{3\text{спож}} + \underline{S}_{3M} = 936 + j1251 - 304 + j431 = 632 + j1682 = \underline{S}_{3\text{пост}}.$$

Потужності \underline{S}_{2M} та \underline{S}_{3M} можуть бути представлені також як вироблювані джерелами в другій і третій гілках, ЕРС яких дорівнює ЕРС взаємоіндукції ($\underline{E}_{2M} = -j\omega M \underline{I}_3$; $\underline{E}_{3M} = -j\omega M \underline{I}_2$):

$$\underline{S}_{2M} = -j\omega M \underline{I}_3 \underline{I}_2^* = -2e^{j90} \cdot 17,66e^{-j11.1} \cdot 14,93e^{-j24.1} = 527,3e^{-j125.2} =$$

$$= -304 - j431 \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_{3M} = -j\omega M \underline{I}_2 \underline{I}_3^* = -2e^{j90} \cdot 14,93e^{j24.1} \cdot 17,66e^{j11.1} = 527,3e^{-j54.8} =$$

$$= 304 - j431 \text{ ВА}.$$

Тоді баланс потужностей буде мати вигляд:

$$\underline{S}_{2\text{сспо}} = \underline{S}_{2\text{пост}} + \underline{S}_{2M} = 527 - j672 - 304 - j431 = 223 - j1103 \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_{3\text{спож}} = \underline{S}_{3\text{пост}} + \underline{S}_{3M} = 632 + j1681 + 304 - j431 = 936 + j1251 \text{ ВА}.$$

8. СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Основы теории цепей: учебник для вузов. / Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. / Л.А. Бессонов –Москва : Энергия, 1978. – 592 с.
3. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники : у 2 т. Т. 1 / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
4. Атабеков Г.И. Линейные электрические цепи. / Г.И. Атабеков – Москва : Энергия, 1978. – 175 с.
5. Байдак Ю.В. Основи теорії кіл : Навч. посіб. – Київ : Вища шк. : Слово, 2009. 271 с.
6. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. Учеб. пособ. для электротехнич., радиотехнич. спец. вузов. / М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. – Москва : Высшая школа, 1990. – 544с.
7. Бессонов Л.А. Сборник задач по теоретическим основам электротехники : учеб. пособие для энерг. и приборост. спец. вузов./ Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди и др.; Под ред. Л.А. Бессонова. — Москва : Высш. шк., 1988. — 543 с.
8. Методические указания по выполнению расчетно-графического задания по теме «Расчет линейных электрических цепей постоянного и гармонического тока» / Сост. В.М. Боев, Л.В. Казаковцева, В.П. Самсонов – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 48с.
9. СТБУЗ – ХПИ – 3.01-2002 ССОУП. Текстовые документы в сфере учебного процесса. Общие требования к выполнению.
10. СТБУЗ – ХПИ – 3.02-2002 ССОУП. Учебно-методические документы.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1. Варіанти завдання за розрахунками кола гармонійного струму.

№ варіанта	I		II		III		IV		V		VI	
	схема	числа	схема	числа	схема	числа	схема	числа	схема	числа	схема	числа
1	25	19	19	7	13	25	7	13	1	1	25	7
2	2	26	8	8	14	8	20	14	26	26	2	14
3	27	21	21	9	15	27	9	15	3	3	21	15
4	10	10	16	22	22	10	4	4	4	22	16	16
5	23	5	17	11	5	23	11	17	5	5	17	23
6	24	18	12	6	18	12	6	24	12	12	18	24
7	7	7	13	19	19	1	25	13	1	7	13	7
8	26	14	20	8	14	2	8	26	2	20	14	20
9	15	21	9	9	21	3	27	15	3	27	21	9
10	22	16	16	4	10	22	4	4	10	16	22	22
11	17	17	5	11	23	23	17	5	11	11	5	17
12	6	18	12	12	18	24	6	12	24	18	12	6
13	19	25	13	13	19	19	25	1	19	13	1	25
14	2	14	8	20	14	26	20	2	26	8	14	14
15	27	9	21	27	15	15	21	21	27	3	9	15
16	16	22	16	4	10	10	22	4	22	22	4	16

Продовження таблиці А.1.

№ варіанта	I		II		III		IV		V		VI	
	схема	числа	схема	числа	схема	числа	схема	числа	схема	числа	схема	числа
17	11	5	23	17	5	5	17	11	23	23	5	11
18	24	24	12	18	24	12	18	6	24	6	18	24
19	13	1	7	19	1	7	25	25	1	25	19	13
20	26	2	20	20	14	20	8	14	2	8	26	8
21	21	15	15	3	9	21	3	9	27	27	15	21
22	4	22	16	10	10	4	22	22	4	16	10	22
23	11	17	5	23	17	17	11	23	5	11	23	11
24	6	6	12	24	24	6	18	18	12	6	24	12
25	1	13	7	25	13	7	7	1	1	19	25	25
26	2	2	20	26	8	2	14	14	26	20	8	26
27	3	15	9	27	15	9	3	21	9	3	27	3
28	30	29	28	28	29	28	30	30	29	30	28	30
29	28	30	30	28	28	29	29	29	30	29	29	28
30	29	30	28	30	28	28	29	30	30	30	30	29
31	7	1	1	19	1	25	13	7	19	13	25	7
32	8	32	2	2	14	14	26	26	20	32	20	8
33	9	33	21	15	3	9	21	21	21	33	15	3
34	16	22	22	4	16	4	4	16	16	10	22	16

Варіанти схем кіл гармонійного струму наведені на рис. А.1.

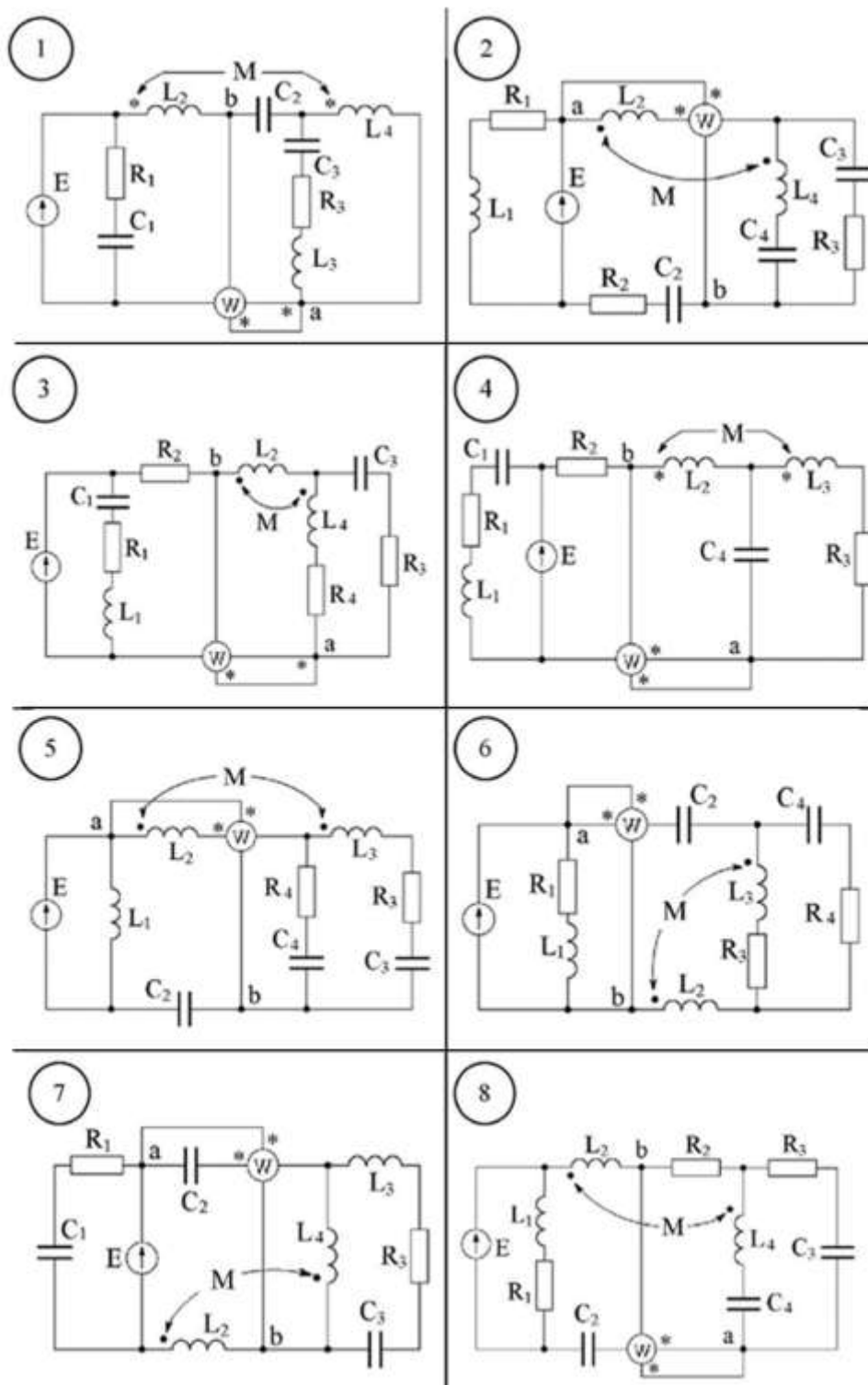


Рисунок А.1 (аркуш 1)

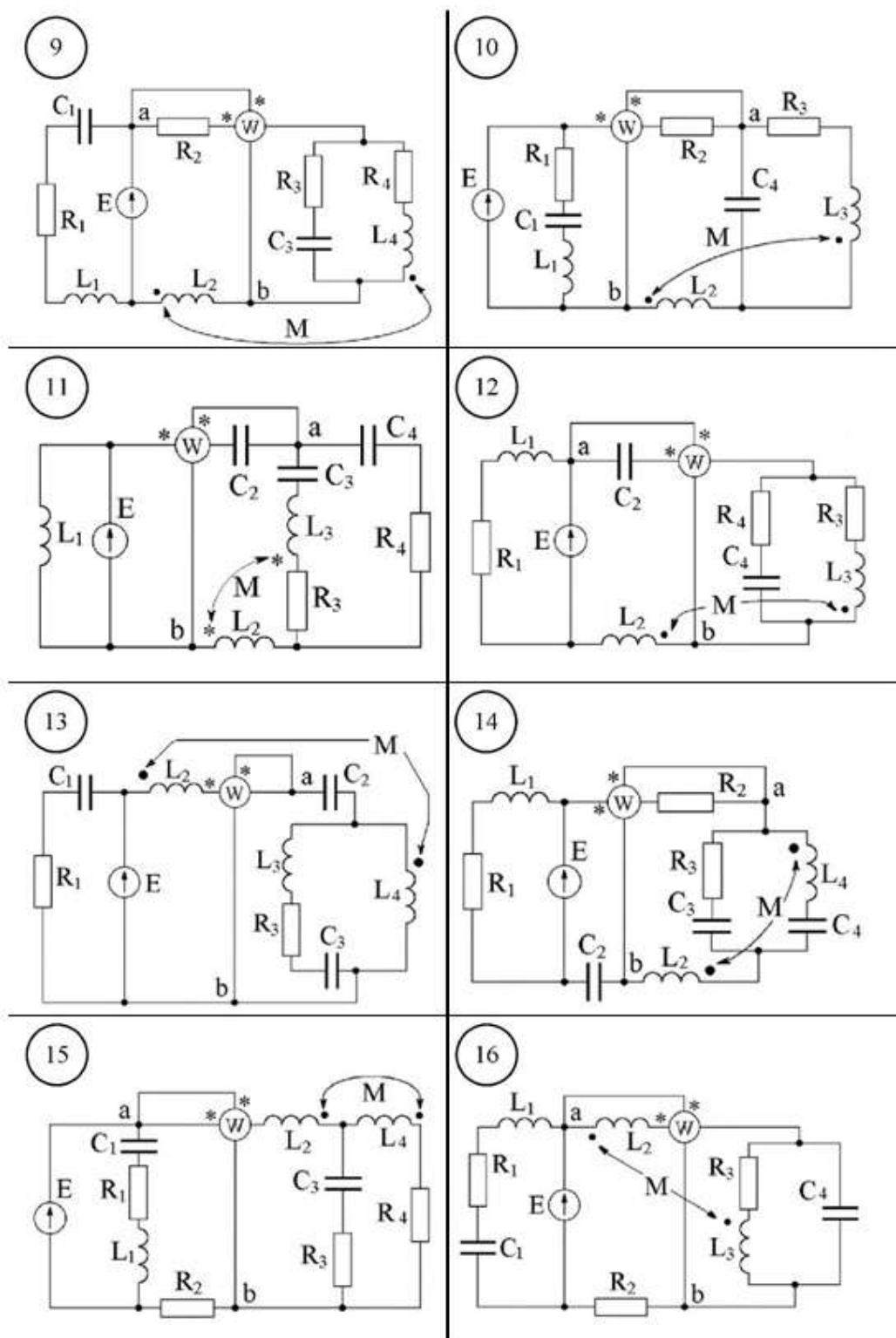


Рисунок А.1 (аркуш 2)

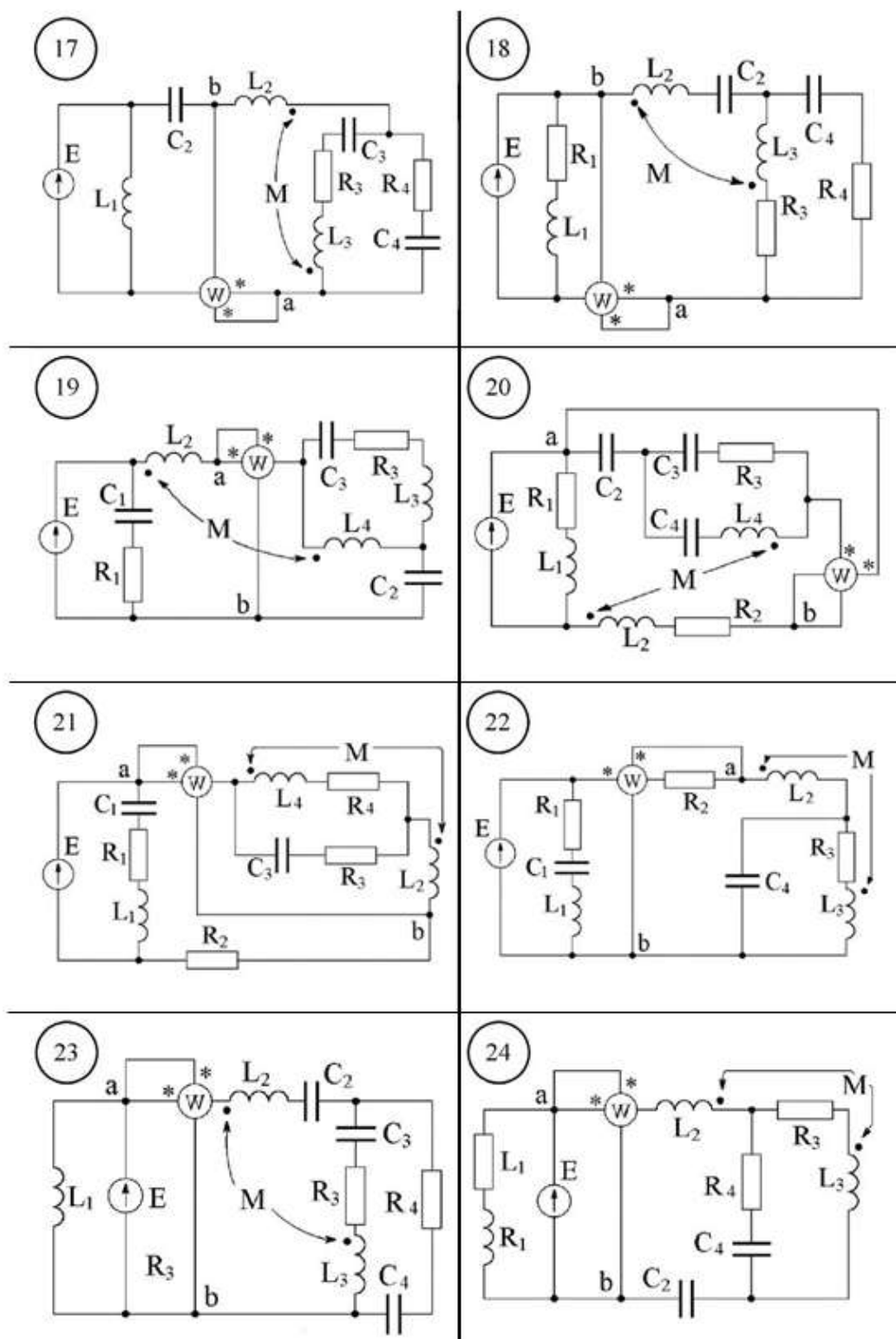


Рисунок А.1 (аркуш 3)

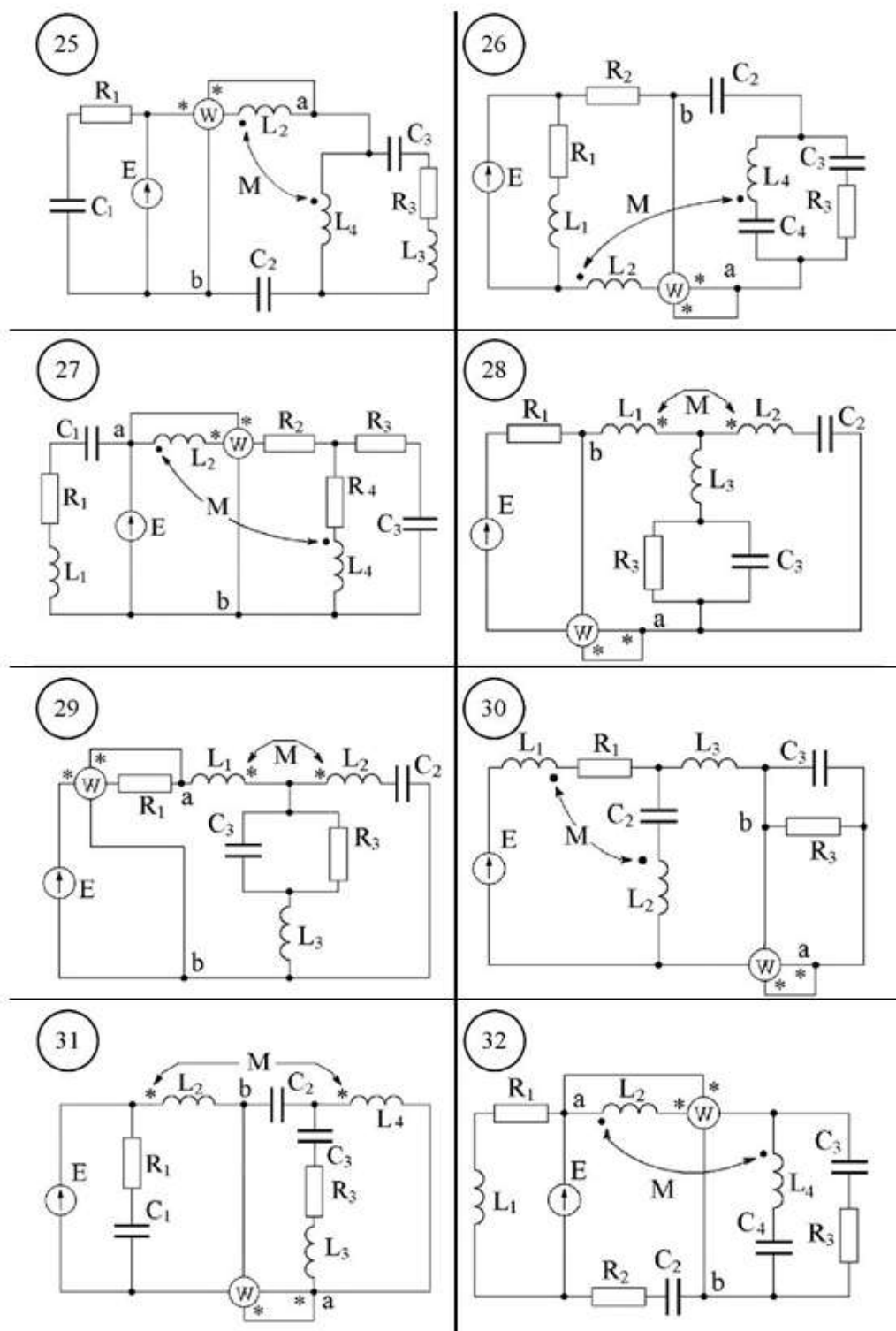


Рисунок А.1 (аркуш 4)

Варіанти числових даних параметрів схем кола гармонійного струму наведені в таблиці А.2.

Таблиця А.2. Параметри схеми кола

№ з/п	E В	ψ_e рад	f Гц	R ₁ Ом	L ₁ мГн	C ₁ мкФ	R ₂ Ом	L ₂ мГн	C ₂ мкФ	R ₃ Ом	L ₃ мГн	C ₃ мкФ	R ₄ Ом	L ₄ мГн	C ₄ мкФ	M мГн
1	120	$\pi/2$	500	4	-	20	-	1	30	5	10,13	10	-	2	-	0,5
2	60	$\pi/6$	100	4	40	-	2	25,5	50	10	-	125	-	50	102	10
3	140	$\pi/3$	200	15	25,32	25	5	10	-	6	-	100	3	5	-	2
4	220	$\pi/4$	250	35	32	40	20	4	-	40	40	-	-	-	20	10
5	400	$\pi/6$	100	-	50	-	-	50	200	30	63,7	39,8	10	-	75	25
6	50	$-\pi/4$	400	6	10	-	-	12,75	6,25	40	12,5	-	60	-	5	5
7	240	$\pi/2$	50	4	-	200	-	10	300	5	101,3	100	-	20	-	5
8	300	$\pi/6$	500	4	8	-	2	5,1	10	10	-	25	-	10	20,4	2
9	280	$\pi/3$	250	15	20,26	20	5	8	-	6	-	80	3	4	-	1,6
10	110	$\pi/4$	200	35	40	50	20	5	-	40	50	-	-	-	25	12,5
11	40	$\pi/6$	200	-	25	-	-	25	100	30	31,85	19,9	10	-	37,5	12,5
12	100	$-\pi/4$	250	6	16	-	-	20,4	10	40	20	-	60	-	8	8
13	360	$\pi/2$	250	4	-	40	-	2	60	5	20,26	20	-	4	-	1
14	360	$\pi/6$	50	4	80	-	2	51	100	10	-	250	-	100	204	20
15	70	$\pi/3$	500	15	10,13	10	5	4	-	6	-	40	3	2	-	0,8
16	220	$\pi/4$	50	35	160	200	20	20	-	40	200	-	-	-	100	50
17	200	$\pi/6$	250	-	20	-	-	20	80	30	25,48	15,92	10	-	30	10
18	500	$-\pi/4$	100	6	40	-	-	51	25	40	50	-	60	-	20	20
19	240	$\pi/2$	100	4	-	100	-	5	150	5	50,65	50	-	10	-	2,5
20	120	$\pi/6$	200	4	20	-	2	12,75	25	10	-	62,5	-	25	51	5
21	140	$\pi/3$	50	15	101,3	100	5	40	-	6	-	400	3	20	-	8
22	110	$\pi/4$	100	35	80	100	20	10	-	40	100	-	-	-	50	25
23	400	$\pi/6$	50	-	100	-	-	100	400	30	127,4	79,6	10	-	150	50
24	100	$-\pi/4$	200	6	20	-	-	25,5	12,5	40	25	-	60	-	10	10
25	120	$\pi/2$	200	4	-	50	-	2,5	75	5	25,32	25	-	5	-	1,25

Продовження таблиці А.2.

№ з/п	E В	φ_e рад	f Гц	R ₁ Ом	L ₁ мГн	C ₁ мкФ	R ₂ Ом	L ₂ мГн	C ₂ мкФ	R ₃ Ом	L ₃ мГн	C ₃ мкФ	R ₄ Ом	L ₄ мГн	C ₄ мкФ	M мГн
26	60	$\pi/6$	250	4	16	-	2	10,2	20	10	-	50	-	20	40,8	4
27	70	$\pi/3$	100	15	50,65	50	5	20	-	6	-	200	3	10	-	4
28	1000	$\pi/2$	50	20	200	-	-	30	160	5	2	160	-	-	-	50
29	1200	$\pi/2$	400	20	25	-	-	3,75	20	5	2,5	20	-	-	-	6,25
30	600	$\pi/2$	200	20	50	-	-	7,5	40	5	5	40	-	-	-	12,5
31	240	$\pi/2$	50	4	-	200	-	10	300	5	101,3	100	-	20	-	5
32	300	$\pi/6$	500	4	8	-	2	5,1	10	10	-	25	-	10	20,4	2
33	140	$\pi/3$	200	15	25,32	25	5	10	-	6	-	100	3	5	-	2
34	110	$\pi/4$	200	35	40	50	20	5	-	40	50	-	-	-	25	12,5

ДОДАТОК Б

Приклад оформлення титульного аркуша

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кафедра “ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ”

ЗВІТ

з розрахункової роботи № ____ на тему:

**Розрахунок розгалужених лінійних електричних кіл гармонійного
струму
по курсу Теоретичні основи електротехніки**

Виконав:
студент групи _____

(П.І.Б.) (Підпис)

Викладач: _____

Прийнято: _____
(Оцінка) (Підпис)

“ ____ ” _____ 20 ____ р.

м. Харків
